Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 37, 1. 2026. (83-96)

Ferdowsi University of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

https://jmme.um.ac.ir

Iron&Steel Society of Iran

Synthesis of Graphene-Based Photocatalyst Nanocomposites Combined with Nickel Ferrite and Nickel Oxide in Order to Remove the Toxic Dyes of Acid Black and Acid Brown.

Research Article

Kareem Khaleel Ibrahim Jburi[1], Amir Hoshang Ramezani[2]

DOI: 10.22067/jmme.2025.91746.1178

1- Introduction

In recent decades, the issue of environmental pollution has become one of the fundamental challenges of the global community due to the widespread use of toxic chemicals in various industries. Among the common environmental pollutants, pollution caused by toxic pigments is of particular concern. Toxic pigments such as black acid and brown acid, which are used in various industrial processes, can be a major source of water pollution and health hazards for humans and the environment. In order to solve this problem, active research is being conducted to develop effective and sustainable technologies for removing toxic pigments from water. One of the practical approaches for removing toxic pigments is the use of photocatalytic materials. In photocatalysis, catalytic nanomaterials are used as photoactivators to initiate and improve chemical processes by absorbing sunlight. One of the catalytic materials that has attracted much attention in this field is graphene. Considering the above, it can be concluded that photocatalytic graphene nanocomposites with nickel ferrite and nickel oxide can be used as effective candidates in the removal and destruction of toxic dyes. The results of UV-Vis analysis for graphene-nickel ferrite-nickel oxide samples are presented, and the difference in light absorption in the visible-ultraviolet range is investigated.

2- Research Methodology

In this section, we will review the research methodology for the synthesis of graphene-based photocatalyst nanocomposites with a combination of nickel ferrite and nickel oxide for the removal of toxic acid black and acid brown dyes. After the successful synthesis of the nanocomposites, we plan to analyze the structural, morphological, and optical properties in detail. This research utilizes a combination of advanced nanomaterials, specifically graphene, nickel oxide, and nickel ferrite. These distinct nanomaterial compounds, characterized by their unique properties, are selected with the intention of creating a synergistic nanocomposite tailored for photocatalytic applications. The primary objective is to harness the enhanced properties of these materials in addressing the removal of toxic dyes, specifically targeting acidic black and brown dyes.

Graphene, a two-dimensional carbon allotrope, is renowned for its exceptional electrical conductivity, mechanical strength, and large surface area. Nickel oxide, as a metal oxide component, contributes to the nanocomposite's catalytic activity. Meanwhile, nickel ferrite, with its magnetic properties, adds another dimension to the composite's functionality. The deliberate combination of these materials aims to exploit their individual strengths, offering a comprehensive solution for the efficient degradation of toxic dyes through photocatalysis. This nanocomposite synthesis represents a strategic approach to overcoming the limitations of traditional photocatalytic materials, addressing issues such as recombination of electron-hole pairs and ensuring optimal performance in the removal of acid black and brown dyes. We will use techniques and equipment such as scanning electron microscopy (SEM) and ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis) for these purposes. In the following, the photocatalytic performance of the nanocomposites in the removal of toxic acid black and acid brown dyes will be evaluated by experimental tests and using UV-Vis absorption curves.

3- Experiment Method

Graphene synthesis method using the Hammer method is one of the most common methods for producing graphene. This method usually starts with graphite as a precursor. First, graphite is selected as a precursor. Then, this graphite is prepared layer by layer or in powder form. An ice bath (zero temperature) is prepared using permanganate and potassium nitrate. Graphite is placed

* Manuscript received January 20, 2025, Revised July 27, 2025, Accepted November 12, 2025.

[1] MDs. Department Of Physics ,Science and Research Branch, Islamic Azad University,Tehran ,Iran.

[2] Corresponding Author: Assistant professor, Department Of Physics ,West Tehran Branch ,Islamic Azad University,Tehran,Iran.

Email: ramezani.1972@gmail.com

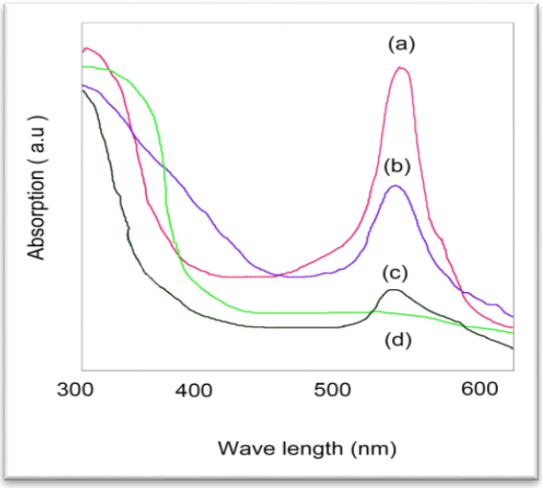
layer by layer in the ice bath and combined with the resulting mixture of permanganate and potassium nitrate. Graphite oxidation occurs in the ice bath and leads to the formation of graphene. The resulting graphene has different oxygen groups on the graphene structure. After the oxidation process is completed, graphene is obtained, which can be in powder or liquid form. Heat is applied to the graphite to reduce the oxygen groups and convert it into graphene. Finally, graphene is formed in the form of three-dimensional clusters.

4- Results

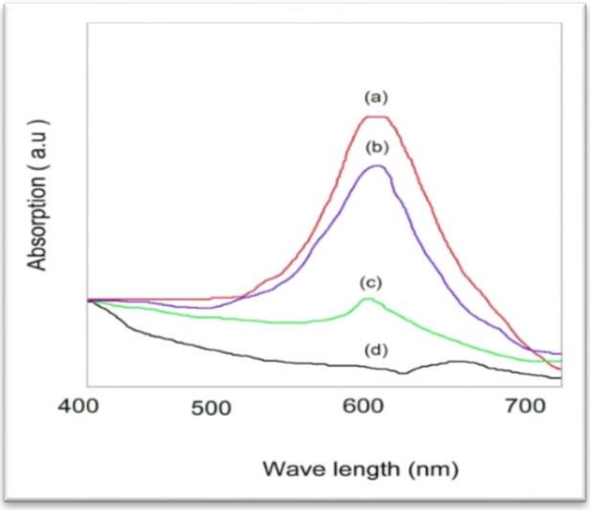
The results of UV-Vis analysis for graphene-nickel ferrite-nickel oxide samples are presented, and the difference in light absorption in the visible-ultraviolet range is investigated. Explanation of UV-Vis absorption analysis on pure brown acid at different time intervals (30, 60, 120 min) is shown in Fig. 9. At this time, the brown acid sample (pure) is exposed to visible-ultraviolet waves, and the light absorption in this range is measured. Changes in the light absorption spectrum in the visible-ultraviolet range indicate the molecular and color characteristics of the sample at that particular time. Over the 60 min time period, changes in light absorption may indicate changes in the molecules of the sample. An increase or decrease in the light absorption at some time points may be related to changes in the structure or preparation of the sample.

5- Conclusion

In this study, graphene, nickel ferrite, and nickel oxide were combined to produce photocatalytic nanocomposites for the removal of toxic acid black and brown dyes. The experimental results show that the nanocomposites obtained from this study are able to effectively and efficiently remove toxic acid black and brown dyes. The results also show that adding graphene to the nanocomposite improves its magnetic properties and introduces the final sample as a magnetic material with strong properties. Considering the above, it can be concluded that photocatalytic graphene nanocomposites with nickel ferrite and nickel oxide can be used as effective candidates in the removal and destruction of toxic dyes.



UV-Visible absorption analysis of (a) pure brown acid, (b) 30, (c) 60, and (d) 120 min.



UV-Visible absorption analysis of (a) pure black acid, (b) 30, (c) 60, and (d) 120 min.

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۷، ۱، ۱۴۰۵. (۸۳ -۹۶)

مهندسی متالورژی و مواد

https://jmme.um.ac.ir/

سنتز نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیست زمینه گرافنی ترکیب شده با فریت نیکل و اکسید نیکل به منظور حذف رنگ‌های سمی اسید سیاه و اسید قهوه‌ای*

مقاله پژوهشی

کریم خلیل ابراهیم جبوری[۱]　　　امیر هوشنگ رمضانی[۲]

DOI: 10.22067/jmme.2025.91746.1178

چکیده *این پژوهش به سنتز نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیست زمینه گرافنی ترکیب شده با فریت نیکل و اکسید نیکل به منظور حذف رنگ‌های سمی اسید سیاه و اسید قهوه‌ای می‌پردازد. فرایند سنتز توسط روش‌های هامر و ماکروویو صورت گرفته است. مطالعات آنالیزی با استفاده از SEM، XRD، VSM، و UV-Vis انجام شده است و خواص مغناطیسی و فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. تست‌های آنتی باکتریال نیز توسط باکتری کلیفرم اجرا شده است. نتایج نشان می‌دهند که این نانوکامپوزیت‌ها نقش مؤثری در حذف آلودگی‌های رنگی و خاصیت‌های آنتی باکتریال دارند. این پژوهش نه تنها بهبود فرایند سنتز و خواص نانوکامپوزیت‌ها را توصیه می‌کند، بلکه کاربردهای گسترده‌تری نیز در زمینه‌های مختلف ارائه می‌دهد. تهیه گرافن در این پژوهش به منظور افزودن خاصیت مغناطیسی به نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی انجام شده است. گرافن به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از جمله هادی بودن و خاصیت همگنی در افزودن مغناطیس به نانوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. به تعبیر دقیق‌تر، اضافه کردن لایه گرافن به ساختار نانوکامپوزیت، خاصیت مغناطیسی را افزایش می‌دهد و در نتیجه، نمونه نهایی به عنوان یک ماده مغناطیسی قوی معرفی می‌شود.*

واژه‌های کلیدی نانوکامپوزیت فوتوکاتالیستی، گرافن، فریت نیکل، اکسید نیکل، آنتی باکتریال.

Synthesis of Graphene-based Photocatalyst Nanocomposites Combined with Nickel Ferrite and Nickel Oxide in order to Remove the Toxic Dyes of Acid Black and Acid Brown

Kareem Khaleel Ibrahim Jburi　　　Amir Hoshang Ramezani

Abstract *The synthesize graphene-based photocatalytic nanocomposites incorporating nickel ferrite ($NiFe_2O_4$) and nickel oxide (NiO) for the efficient removal of toxic acidic black and acidic brown dyes have been investigated. The synthesis process was meticulously executed using hammer, microwave, and macro-waves methods to enhance the nanocomposite's structure and properties. Comprehensive analytical studies employing scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), vibrating sample magnetometry (VSM), and UV-Vis spectroscopy were conducted to assess the magnetic and photocatalytic characteristics of the synthesized nanocomposites. Additionally, antibacterial tests were performed using Klebsiella bacteria to evaluate the potential antimicrobial properties. The results of the study illustrate the significant impact of the synthesized nanocomposites in removing color pollutants, emphasizing their potential as effective photocatalysts. Furthermore, the nanocomposites exhibit notable antibacterial properties, showcasing their multifunctional applications. The research not only recommends further refinement of the synthesis process and optimization of nanocomposite properties but also suggests broader applications in diverse fields, considering the multifaceted nature of the developed materials.*

Keywords Photocatalytic nanocomposite, Graphene, Nickel ferrite, Nickel oxide, Toxic.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۱/۱ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۸/۲۱ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

(۲) نویسندهٔ مسئول؛ استادیار، گروه فیزیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران.

Email: ramezani.1972@gmail.com.

مقدمه

در چند دهه اخیر، مسئله آلودگی محیط زیست به دلیل استفاده گسترده از مواد شیمیایی سمی در صنایع مختلف به یکی از چالش‌های اساسی جامعه جهانی تبدیل شده است. از جمله آلودگی‌های رایج در محیط زیست، آلودگی ناشی از رنگ‌دانه‌های سمی مورد توجه ویژه‌ای قرار می‌گیرد. رنگ‌دانه‌های سمی مانند اسید سیاه و اسید قهوه‌ای، که در فرایندهای صنعتی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توانند منبع اصلی آلودگی آب و خطرات بهداشتی برای انسان و محیط زیست باشند. به منظور حل این مسئله، تحقیقات فعال در زمینه توسعه فناوری‌های مؤثر و پایدار برای حذف رنگ‌دانه‌های سمی از آب در حال انجام است. یکی از رویکردهای کاربردی برای حذف رنگ‌دانه‌های سمی، استفاده از فوتوکاتالیز است. در فوتوکاتالیز، نانومواد کاتالیزور به عنوان فعال‌کننده‌های نوری استفاده می‌شوند تا با جذب نور خورشید، فرایندهای شیمیایی را آغاز و بهبود بخشند. یکی از مواد کاتالیزوری که در این زمینه توجه بسیاری را به خود جلب کرده است، گرافن است [1-3].

گرافن به عنوان یک نانوماده دوبعدی با خواص الکترونیکی، حرارتی و مکانیکی بسیار منحصر به فرد، توانسته است توجه پژوهشگران را در سراسر جهان به خود جلب کند. فوتوکاتالیز با استفاده از کاتالیزورهای گرافنی، به عنوان روشی سبز و کارآمد برای حذف رنگ‌دانه‌های سمی از آب، به عنوان یک راهکار مطرح شده است. گرافن به عنوان یک نوع جدیدی از نانومواد کربنی به دلیل ساختار همجوار دوبعدی و خواص الکترونیکی منحصر به فرد خود، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در کاربردهای نانوکامپوزیت‌های فعال ـ نوری مبتنی بر گرافن در بهبود محیط زیست و تبدیل انرژی، شامل تجزیه فتوکاتالیتیک آلاینده‌های آلی، سلول‌های خورشیدی فوتوالکتروشیمیایی و تولید سوخت خورشیدی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، چشم‌انداز چالش‌ها و فرصت‌ها در این حوزه نوظهور نیز مورد بحث قرار می‌گیرد.

از طریق فناوری نانو، پیش‌بینی می‌شود که مواد نانوساختار با استفاده از رویکرد پایین به بالا توسعه داده شوند. مواد و محصولات بیشتری از پایین به بالا، یعنی با ساختن آن‌ها از اتم‌ها، مولکول‌ها و پودرها، الیاف و سایر اجزای ساختاری کوچک ساخته شده از آن‌ها در مقیاس نانو ساخته می‌شوند. این با تمام تولیدات قبلی متفاوت است، که در آن مواد خام ... فشرده، بریده شده، قالب‌گیری می‌شوند و به شکل دیگری به قطعات و محصولات تبدیل می‌شوند [4]. دانشمندان و مهندسانی که با کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کار می‌کنند، این رویکرد از پایین به بالا را در فرآوری و ساخت برای دهه‌ها تمرین کرده‌اند. هنگام طراحی یک کامپوزیت، خواص مواد برای عملکرد مطلوب در مقیاس‌های طولی مختلف تنظیم می‌شوند [7-5].

ذرات در مقیاس میکرون معمولاً نور را پراکنده می‌کنند و در غیر این صورت مواد ماتریس شفاف، مات به نظر می‌رسند. ناگانوما و کاگاوا [8] در مطالعه خود بر روی کامپوزیت‌های SiO_2 اپوکسی نشان دادند که کاهش اندازه ذرات منجر به بهبود قابل توجهی در عبور نور مرئی می‌شود. سینگ و همکاران [9] تغییرات چقرمگی شکست رزین پلی‌استر را به دلیل افزودن ذرات آلومینیمی با قطرهای ۲۰، ۳.۵ و ۱۰۰ نانومتر مورد مطالعه قرار داد [15-10].

پیشرفت‌های اخیر در تولید مواد نانوساختار با خواص مواد جدید، تحقیقات را برای ایجاد مواد مهندسی ماکروسکوپی چند منظوره با طراحی ساختارهایی در مقیاس نانومتر تحریک کرده است. با انگیزه اشتیاق اخیر در فناوری نانو، توسعه نانوکامپوزیت‌ها یکی از حوزه‌های تحقیقاتی کامپوزیت‌هاست که به سرعت در حال توسعه است. نانوتکنولوژی را می‌توان به طور کلی این گونه تعریف کرد: «ایجاد، پردازش، مشخص‌سازی و استفاده از مواد، دستگاه‌ها و سیستم‌هایی با ابعادی در حدود ۰،۱ تا ۱۰۰ نانومتر، که ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی جدید و به طور قابل توجهی افزایش یافته، پدیده‌ها و فرایندها به دلیل اندازه‌های نانومتری خود را نشان می‌دهند» [20-16].

نانوالیاف کربنی دارای مورفولوژی‌های گسترده‌ای هستند [22]. نانوالیاف کربنی معمولاً دارای قطرهایی در حدود ۵۰ تا ۲۰۰ نانومتر هستند. وی و سریواستاوا [31] خواص مکانیکی نانوالیاف کربنی را با مورفولوژی متفاوت با استفاده از تئوری ارتجاعی پیوسته و شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی مدل‌سازی کرده‌اند. مورفولوژی گسترده نانوالیاف کربن و خواص مرتبط با آن‌ها منجر به طیف گسترده‌ای از پراکندگی برای نتایج تجربی در پردازش و خصوصیات کامپوزیت‌های نانوالیاف می‌شود. فینگان و همکارانش [23,24] پردازش و خواص نانوکامپوزیت‌های نانوالیاف کربنی/ پلی پروپیلن را بررسی کرده‌اند.

روش تحقیق

در این بخش، برای سنتز نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیست زمینه گرافنی با ترکیب فریت نیکل و اکسید نیکل به منظور حذف رنگ‌های سمی اسید سیاه و اسید قهوه‌ای را بررسی خواهیم کرد. به منظور ایجاد یک فرایند سنتز بهینه و کنترل شده، از یک روش تحقیق جامع و سیستماتیک استفاده خواهیم کرد.

در ابتدا، یکی از چالش‌های اصلی در این تحقیق انتخاب یک روش سنتز مطمئن و کارآمد برای تهیه نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیست گرافنی با ترکیب فریت نیکل و اکسید نیکل است. ما به دنبال روشی هستیم که بتواند به طور دقیق نانوذرات گرافنی را با ترکیب این دو ماده تولید کند و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مناسبی فراهم آورد.

پس از سنتز موفق نانوکامپوزیت‌ها، قصد داریم ویژگی‌های ساختاری، مورفولوژیکی و اپتیکی را به صورت دقیق تجزیه و تحلیل کنیم. از تکنیک‌ها و تجهیزاتی مانند میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف‌سنجی مرئی ـ فرابنفش (UV-Vis)برای این مقاصد استفاده خواهیم کرد.

در ادامه، عملکرد فوتوکاتالیستی نانوکامپوزیت در حذف رنگ‌های سمی اسید سیاه و اسید قهوه‌ای به وسیله آزمایش‌های تجربی و استفاده از منحنی‌های جذب ـ اشعه رنگی (UV-Vis) ارزیابی خواهد شد. این بخش از تحقیق، اطلاعاتی در مورد کارایی و کاربرد پتانسیل نانوکامپوزیت فوتوکاتالیست گرافنی با ترکیب فریت نیکل و اکسید نیکل در حذف آلاینده‌های سمی اسیدی خواهد داد. همه مواد مصرفی از شرکت مرک آلمان خریداری شده است.

روش انجام آزمایش

سنتز گرافن توسط روش هامر

روش سنتز گرافن با استفاده از روش هامر یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای تولید گرافن است. این روش معمولاً با استفاده از گرافیت به عنوان پیش‌ماده آغاز می‌شود. ابتدا، گرافیت به عنوان پیش‌ماده انتخاب می‌شود. سپس این گرافیت لایه‌لایه و یا به شکل پودر تهیه می‌شود. حمام یخ (دمای صفر درجه) با استفاده از پرمنگنات و پتاسیم نیترات آماده می‌شود. گرافیت لایه ـ لایه در حمام یخ قرار می‌گیرد و با مخلوط حاصل از پرمنگنات و پتاسیم نیترات ترکیب می‌شود. اکسیداسیون گرافیت با حمام یخ رخ می‌دهد و به تشکیل گرافن می‌انجامد. گرافن حاصل شده دارای گروه‌های اکسیژنه مختلف بر روی ساختار گرافن است. پس از اتمام فرایند اکسیداسیون، گرافن به دست می‌آید که می‌توان آن را به شکل پودر یا مایع داشت. گرما به گرافیتن اعمال می‌شود تا گروه‌های اکسیژنه کاهش یابند و به گرافن تبدیل شود. نهایتاً گرافن به شکل کلوخه‌های سه‌بعدی تشکیل می‌شود. در این فرایند، دما در حمام یخ تا حداکثر ممکن کم نگه داشته می‌شود تا جلوی اکسیداسیون زیاد گرافیت و افزایش تعداد گروه‌های اکسیژنه را بگیرد. این گام باعث ایجاد گرافن با خواص مناسب می‌شود.

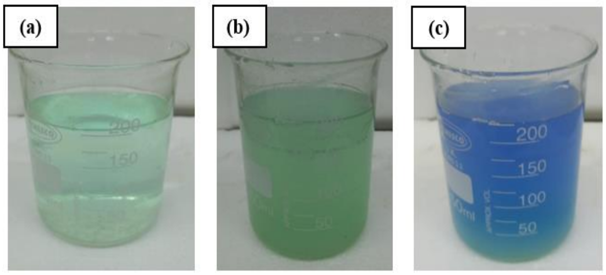
سنتز نیکل فریت با استفاده از مایکروویو

یک صدم مول نیکل نیترات ($Ni(NO_3)_2$) و دو صدم مول آهن نیترات ($Fe(NO_3)_3$) در یک محیط مناسب ترکیب می‌شوند تا ترکیب همگنی از مواد حاصل شود. مخلوط مواد در یک ظرف میکروویو قرار می‌گیرد. زمان مایکروویو روی ۲۰ دقیقه با توان ۹۰۰ وات تنظیم می‌شود. توجه به دما و جلوگیری از افزایش غیر مطلوب دما در مراحل ساخت ضروری است.

سنتز نیکل هیدروکسید با استفاده از مایکروویو

نیکل نیترات به میزان مشخص در آب حل می‌شود تا یک محلول نیکل نیترات ایجاد شود. محلول نیکل نیترات به دلیل ویژگی‌های شیمیایی خود سبز رنگ است. آمونیاک به عنوان رسوب گیرنده افزوده می‌شود. رسوب آبی رنگ تشکیل می‌شود که مربوط به نیکل هیدروکسید است. با افزودن سدیم هیدروکسید، رسوب به رنگ سبز تغییر می‌کند (شکل ۱).

با استفاده از سود، رسوب به حالتی سبک و کلوئیدی تبدیل می‌شود. سنتز در دستگاه مایکروویو با توان ۹۰۰ وات به مدت ۱۰ دقیقه با روش پالسی (۲۰ ثانیه روشن ـ ۶۰ ثانیه خاموش) اجرا می‌شود. پس از اتمام فرایند سنتز، محلول سانتریفوژ می‌شود تا رسوب از محلول جدا شود. رسوب به رنگ آبی به صورت سبک و کلوئیدی تبدیل می‌شود. سپس، با کلسینه در دما و زمان مشخص (۳۰۰ درجه به مدت ۲ ساعت)، نیکل اکسید سیاه رنگ حاصل می‌شود.



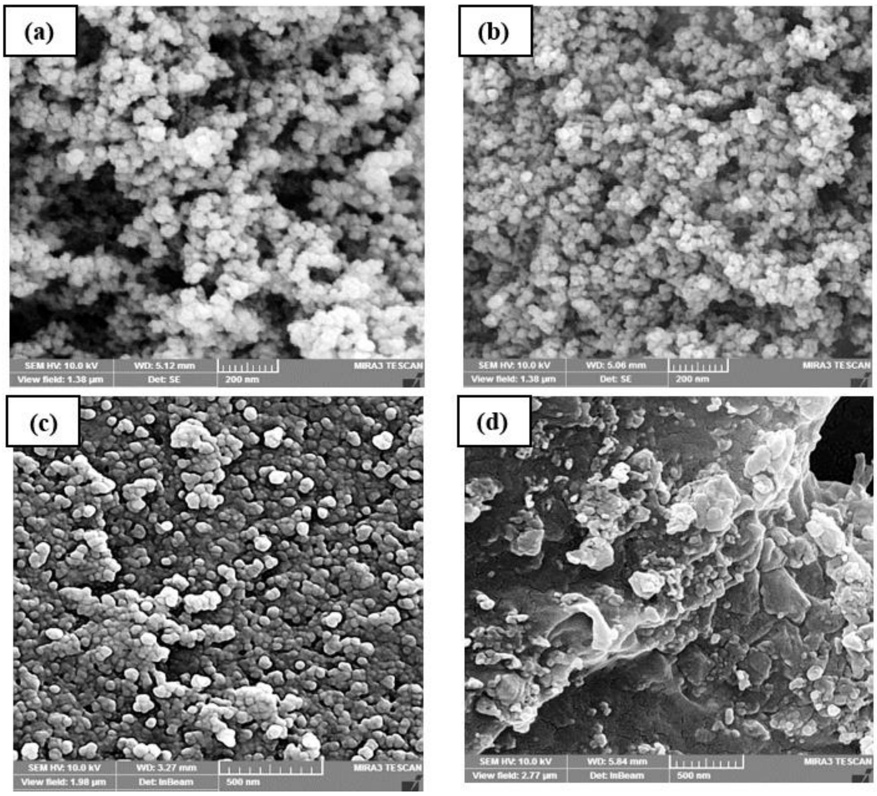
شکل ۱ (a) نیکل هیدروکسید اولیه، (b) نیکل هیدروکسید بعد از حل شدن در سدیم هیدروکسید و (c) نیکل هیدروکسید بعد از افزودن آمونیاک

سنتز نانوکامپوزیت گرافن ـ نیکل فریت ـ نیکل اکسید با استفاده از مایکروویو

گرافن تهیه شده چندین بار با مواد شوینده شسته می‌شود تا از ناخالصی‌ها پاک شود. یک گرم گرافن تهیه و به مقدار دیسپرس کننده (مانند دیمتیل فرمامید) افزوده می‌شود. در شرایط مشابه، سنتز نیکل فریت (در حضور گرافن) دیسپرس و همگن می‌شود. به محلول گرافن، مقادیر مشخص نیکل نیترات و آهن نیترات افزوده می‌شود. واکنش فقط در حضور گرافن انجام می‌شود. سنتز با استفاده از مایکروویو با شرایط خاص (۲۰ ثانیه روشن ـ ۶۰ ثانیه خاموش به مدت ۲۰ دقیقه) انجام می‌شود. پس از اتمام واکنش، کامپوزیت به صورت خودکار، خشک می‌شود. کامپوزیت گرافن ـ نیکل فریت به محلول ساخت نیکل اکسید پخش می‌شود. این بار نیکل نیترات به تنهایی اضافه و سود سوز آور نیز به محلول افزوده می‌شود. سنتز با مایکروویو با شرایط خاص (۲۰ ثانیه روشن ـ ۶۰ ثانیه خاموش به مدت ۲۰ دقیقه) انجام می‌شود. پس از سنتز نیکل اکسید، رسوب به دقت شسته می‌شود تا از ناخالصی‌ها پاک شود. رسوب به صورت دوتایی گرافن ـ نیکل فریت ـ نیکل اکسید حاصل را خشک می‌کنیم.

آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

در این بخش، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های گرافن ـ نیکل فریت ـ نیکل اکسید ارائه می‌شود و جزئیات ساختار سطحی نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل 2a از اکسید نیکل با مقیاس ۲۰۰ نانومتر، گرفته شده است. این مقیاس بیانگر ابعاد کوچک و نانومتری اجزای مورد بررسی است. در تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از فریت نیکل (شکل 2b)، ذرات به خوبی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. مقیاس این تصویر ۲۰۰ نانومتر است و فاصله کاری بین نمونه و لنزهای میکروسکوپ ۵.۰۶ میلی‌متر است. اندازه میدان دید حدود ۱.۳۸ میکرومتر و متوسط اندازه ذرات فریت نیکل در این تصویر حدود ۶۰ نانومتر است. این تصویر به وضوح جزئیات نانومتری ذرات فریت نیکل را نشان می‌دهد و برای مطالعه دقیق ساختار و تراکم ذرات مورد استفاده قرار گرفته است. در تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از کامپوزیت دوتایی فریت نیکل ـ اکسید نیکل (شکل 2c)، ذرات با مقیاس ۵۰۰ نانومتر به وضوح دیده می‌شوند. فاصله کاری بین نمونه و لنزهای میکروسکوپ در این تصویر ۳.۲۷ میلی‌متر و اندازه میدان دید حدود ۱.۹۸ میکرومتر است. متوسط اندازه ذرات در این تصویر حدود ۸۰ نانومتر است. ذرات در این کامپوزیت به طور کاملاً منظم و یکنواخت قرار گرفته‌اند، که نشان دهنده یکنواختی و ترتیب در ترکیب دوتایی فریت نیکل ـ اکسید نیکل می‌باشد. تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از کامپوزیت سه تایی گرافن ـ فریت نیکل ـ اکسید نیکل با مقیاس ۵۰۰ نانومتر نشان دهنده جزئیات دقیقی از ساختار این کامپوزیت است (شکل 2d). با فاصله کاری ۵.۸۴ میلی‌متر و اندازه میدان دید ۲.۷۷ میکرومتر، تصویر به وضوح ذرات و لایه‌های مختلف این کامپوزیت را نمایش می‌دهد. ذرات گرافنی، ذرات فریت نیکل و لایه اکسید نیکل به نحوی به هم تداخل دارند که آن‌ها به طور کاملاً منظم و یکنواخت در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. این تصویر ارائه اطلاعات مفیدی برای درک ساختار دقیق و ترکیبی این کامپوزیت دارد و می‌تواند به تحلیل خواص و کاربردهای احتمالی این مواد نانوساختار کمک کند.

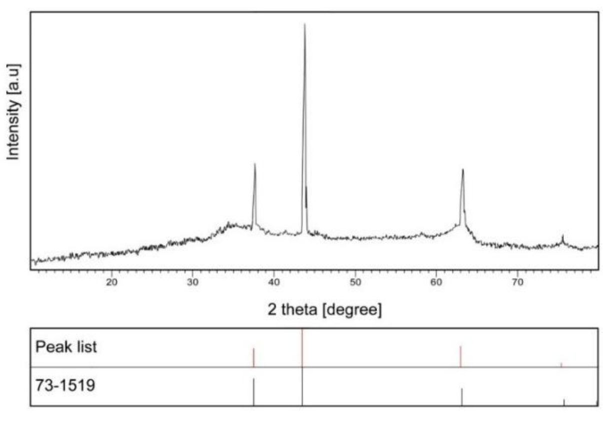


شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترون روبشی: (a) اکسید نیکل، (b) فریت نیکل، (c) کامپوزیت دوتایی فریت نیکل ـ اکسید نیکل و (d) کامپوزیت سه‌تایی گرافن ـ فریت نیکل ـ اکسید نیک

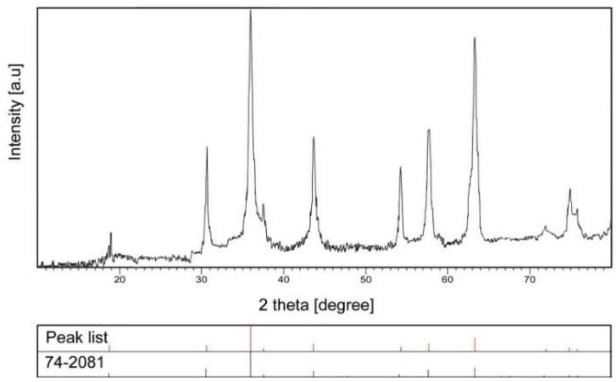
آنالیز پراش پرتو ایکس

در این بخش، نمودارهای XRD برای نشان دادن شیوه تشکیل فازها و ساختار کریستالی نانوکامپوزیت گرافن ـ نیکل فریت ـ نیکل اکسید ارائه می‌شود. شکل (۳) آنالیز پراش پرتو ایکس اکسید نیکل را نشان می‌دهد. پیک‌ها در الگوی پراش نانوذرات اکسید نیکل (JCPDS 47-1049) به وضوح نشان می‌دهند که ترکیب حاصل از این نانوذرات، اکسید نیکل است. این پیک‌ها که به ترتیب در زوایای 2θ برابر با ۳۷.۹۴، ۴۳.۵۱ و ۶۲.۸۷ درجه ظاهر می‌شوند، به ترتیب به نمایه‌های (۱۱۱)، (۲۰۰) و (۲۲۰) اشاره دارند. با این حال، در الگوی پراش، پیک‌های دیگری مربوط به ناخالصی مشاهده نمی‌شود.

الگوی پیک‌های شکل (۴) از فریت نیکل نشان می‌دهد که پیک‌ها بسیار قوی و تیز هستند، که نشان دهنده کریستالیته خوب نمونه آماده شده است. این پیک‌ها در زوایای 2θ با مقادیر ۳۱، ۳۵ ، ۴۵ و ۵۶ درجه قرار دارند که به ترتیب با صفحات بلوری (۳۱۱)، (۲۲۲)، (۴۰۰)، (۵۱۱) و (۴۴۰) در الگوی فریت نیکل مطابقت دارند. این نکته تشکیل فاز اسپینل NFN را تأیید می‌کند. هیچ پیک دیگری یافت نشده است که نشان دهنده نمونه سنتز شده از خلوص بالای iFe_2O_4lN باشد.

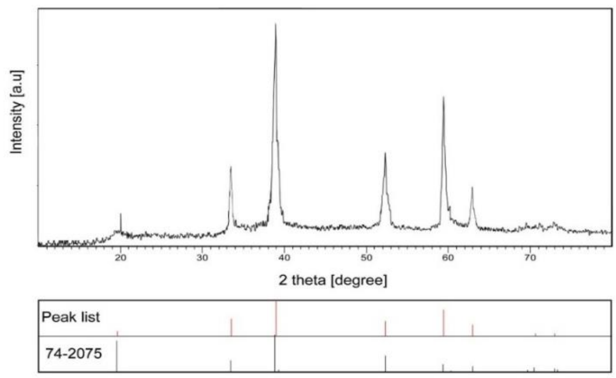


شکل ۳ آنالیز پراش پرتو ایکس اکسید نیکل



شکل ۴ آنالیز پراش پرتو ایکس فریت نیکل

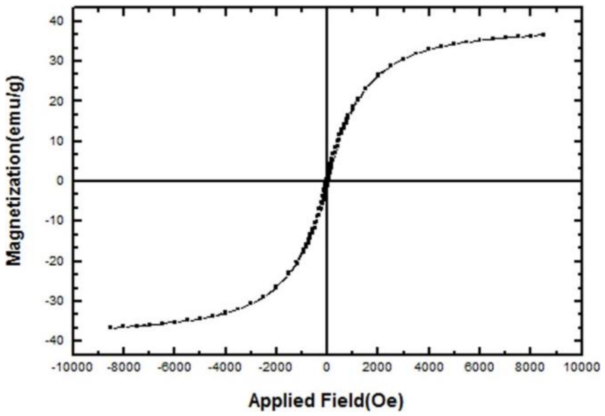
شکل (۵) آنالیز پراش پرتو ایکس هیدروکسید نیکل را نشان می‌دهد. این شکل پیک‌های تیز هیدروکسید نیکل را نشان می‌دهد که بیان می‌دارد نمونه دارای نظم کمتر و مقادیر کمتری از عیوب مسطح است.



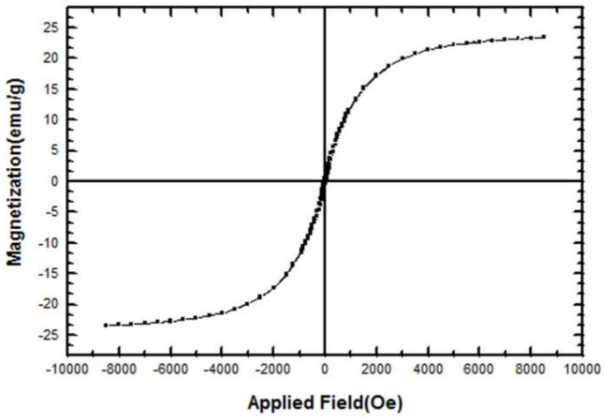
شکل ۵ آنالیز پراش پرتو ایکس هیدروکسید نیکل

آنالیز مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش

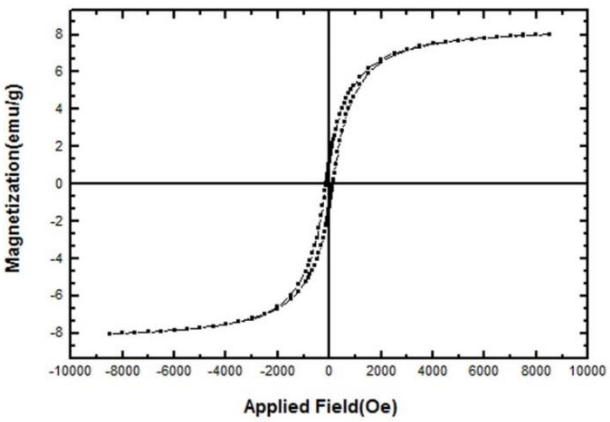
در این قسمت، نتایج آنالیز VSM به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ویژگی‌های مغناطیسی نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گیرند. خواص مغناطیسی نمونه $NiFe_2O_4$ توسط دستگاه VSM اندازه‌گیری شد. در منحنی‌های پسماند M-H، رفتار نوع S برای نمونه آماده شده مشاهده شد (شکل ۶). منحنی‌های مغناطیسی $NiFe_2O_4$ با مواد فرومغناطیسی بسیار نرم هماهنگی دارد. مقدار مغناطیس اشباع برای فریت نیکل (شکل ۷) برابر ۳۷ emu/g، برای کامپوزیت دوتایی هیدروکسید نیکل ـ فریت نیکل (شکل ۸) برابر ۲۴ emu/g و برای کامپوزیت سه تایی گرافن ـ هیدروکسید نیکل ـ فریت نیکل (شکل ۱۰) برابر ۸ emu/g است.



شکل ۶ آنالیز مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش فریت نیکل



شکل ۷ آنالیز مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش کامپوزیت دوتایی هیدروکسید نیکل ـ فریت نیکل



شکل ۸ آنالیز مغناطیس‌سنج نمونه مرتعش کامپوزیت سه‌تایی گرافن ـ هیدروکسید نیکل ـ فریت نیکل

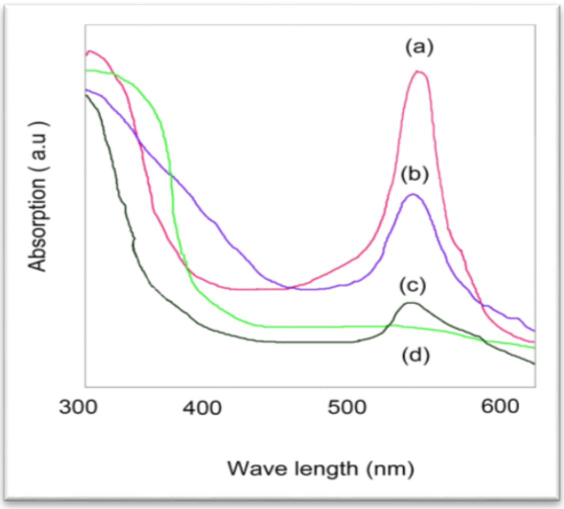
آنالیز جذب مرئی ـ فرابنفش

نتایج آنالیز UV-Vis برای نمونه‌های گرافن ـ نیکل فریت ـ نیکل اکسید ارائه شده و افتراق جذب نور در محدوده مرئی ـ فرابنفش

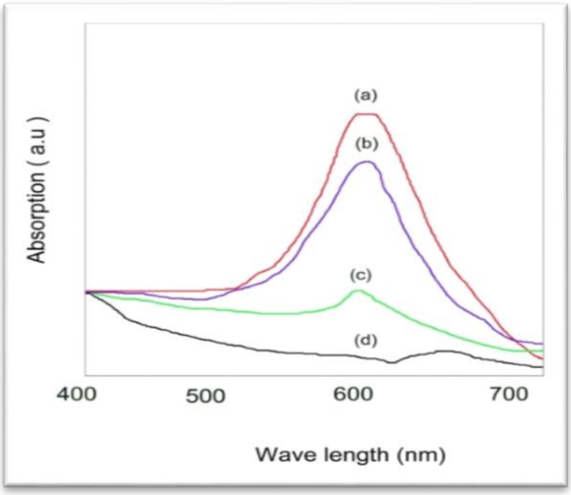
بررسی می‌شود. توضیح آنالیز جذب مرئی ـ فرابنفش (UV-Vis) بر روی اسید قهوه‌ای خالص در بازه‌های زمانی مختلف شکل ۹ (۳۰، ۶۰، ۱۲۰ دقیقه) به شرح زیر است:

در این زمان، نمونه اسید قهوه‌ای (خالص در تعامل با امواج مرئی ـ فرابنفش قرار گرفته و جذب نور در این محدوده اندازه‌گیری شده است. تغییرات در طیف جذب نور در محدوده مرئی ـ فرابنفش نشان دهنده ویژگی‌های مولکولی و رنگی نمونه در آن زمان خاص است. با گذشت زمان ۶۰ دقیقه، تغییرات در جذب نور ممکن است بیانگر تحولاتی در مولکول‌های نمونه باشد. افزایش یا کاهش جذب در برخی مواقع طیف نور ممکن است به تغییرات در ساختار یا آماده‌سازی نمونه ارتباط داشته باشد. پس از گذشت زمان ۱۲۰ دقیقه، تغییرات دیگری در طیف جذب ممکن است مشاهده شود. این زمان بیشترین زمان مطالعه و ارزیابی جذب نور است و ممکن است اطلاعات بیشتری درباره ویژگی‌های مولکولی و رنگی نمونه ارائه دهد. این تحلیل‌ها به طور کلی به ما کمک می‌کنند تا تغییرات در جذب نور و خصوصیات نمونه را در طول زمان درک کنیم و به نتایجی در مورد ساختار و خصوصیات شیمیایی نمونه دست یابیم. پیک مرتبط با طول موج ۵۵۰ نانومتر در طیف جذب مرئی ـ فرابنفش (UVVis) نمونه اسید قهوه‌ای خالص به رنگ سبز مرتبط است. این مشاهده نشان دهنده جذب نور در محدوده سبز نور در خصوصیت‌های نمونه است. به عبارت دیگر، طول موج ۵۵۰ نانومتر در منطقه سبز قرار دارد و جذب نور در این نقطه ممکن است به خصوصیات مولکولی خاص مرتبط با رنگ سبز اطلاعاتی ارائه دهد. آنالیز جذب مرئی ـ فرابنفش (UV-Vis) اسید سیاه خالص نشان می‌دهد (شکل۱۰) که پیک‌های اصلی در محدوده ۶۰۰ نانومتر واقع شده‌اند. در طول زمان، با افزایش مدت زمان آنالیز، تغییرات در این پیک‌ها مشاهده شده است. پیک a، که بلندترین طول موج را داراست، نشان دهنده جذب نور در ۶۰۰ نانومتر یا حتی بلندتر از آن است. این جذب نور در محدوده قرار گرفته می‌تواند به چشم به صورت رنگ قرمز ظاهر شود. به همین دلیل، افزایش طول موج در این پیک نشان دهنده افزایش شدت جذب در محدوده قرمز است. در مقابل، پیک d که کمترین طول موج را داراست، نشان دهنده کاهش جذب نور در محدوده ۶۰۰ نانومتر یا کمتر از آن است. این تغییرات در پیک‌ها ممکن است به دلیل تغییر در ساختار یا خصوصیات مولکولی اسید سیاه در طول زمان باشد. در نتیجه، این تحلیل‌ها می‌توانند به درک بهتر از تغییرات و رفتار اسید سیاه خالص در طول زمان در پژوهش‌های مرتبط کمک کنند. آنالیز جذب مرئی ـ فرابنفش (UV-Vis) اسید قهوه‌ای و اسید سیاه، از دو ترکیب مختلف به دلیل متفاوت بودن در ساختار شیمیایی و خواص فیزیکی هر یک، ممکن است تفاوت‌هایی در نمونه‌ها را نشان دهد.

از جمله تفاوت‌های ممکن می‌توان به مواردی که در ادامه می‌آید اشاره کرد. اسید قهوه‌ای و اسید سیاه دو ترکیب شیمیایی متفاوت هستند که هر کدام از آن‌ها دارای گروه‌های شیمیایی خاص خود هستند. این تفاوت در ساختار مولکولی ممکن است منجر به جذب نور در طول موج‌های خاص و تفاوت‌های در طیف جذب مرئی ـ فرابنفش شود. طول موج‌های ماکزیمم جذب نور (پیک‌ها) در طیف UV-Vis برای هر یک از اسید قهوه‌ای و اسید سیاه ممکن است متفاوت باشد. این اختلاف‌ها ممکن است ناشی از تفاوت در ساختار الکترونی و اجزای مولکولی باشد. با توجه به طول موج‌های جذب نور، رنگ ظاهری نمونه‌ها ممکن است متفاوت باشد. به عنوان مثال، اگر طول موج جذب نور در محدوده قرمز باشد، نمونه، قرمز و اگر در محدوده آبی باشد، آبی به نظر خواهد آمد. اگر تغییراتی در ساختار یا خصوصیات نمونه‌ها در طول زمان رخ دهد، ممکن است تفاوت‌هایی در طیف جذب مرئی ـ فرابنفش مشاهده شود.



شکل ۹ آنالیز جذب مرئی ـ فرابنفش (a) اسید قهوه‌ای خالص، (b) ۳۰، (c) ۶۰ و (d) ۱۲۰ دقیقه



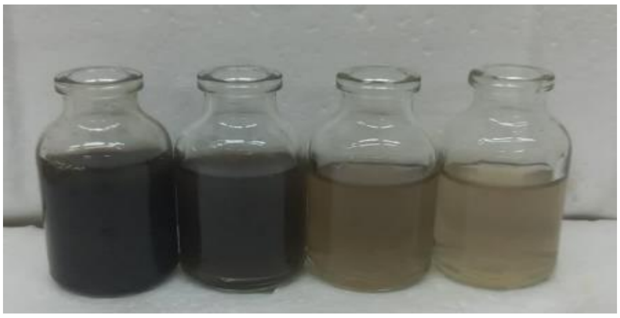
شکل ۱۰ آنالیز جذب مرئی ـ فرابنفش (a) اسید سیاه خالص، (b) ۳۰، (c) ۶۰ و (d) ۱۲۰ دقیقه

تحلیل نتایج آزمایش‌های حذف رنگ

نتایج آزمایش‌های حذف رنگ با استفاده از گرافن ـ نیکل فریت ـ نیکل اکسید به تفصیل مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

پتانسیل تخریب رنگی اسید قهوه‌ای به وسیله نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی زمینه گرافنی با فریت نیکل و اکسید نیکل به واسطه فرایندهای فوتوکاتالیستی افزایش می‌یابد. این فرایندها شامل جذب نور توسط کاتالیست و ایجاد جفت‌های الکترون و حفره است که به تولید رادیکال‌های هیدروکسیل (OH) و دیگر رادیکال‌ها منجر می‌شود. با فعال‌سازی رنگزای طبیعی موجود در اسید قهوه‌ای توسط رادیکال‌ها و تعامل آن‌ها با ترکیبات آلی موجود در رنگ اسید قهوه‌ای، تغییرات شیمیایی در مولکول رنگزا رخ می‌دهد که موجب تحلیل یا تغییرات در ساختار آن می‌شود. این فرایندها می‌توانند به تخریب رنگ و تغییر آن به رنگ‌های دیگر، از جمله زرد کمرنگ، منجر شوند. فرض کنید که اسید سیاه، که یک رنگزای سمی است، در حضور نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی زمینه گرافنی با فریت نیکل و اکسید نیکل قرار دارد. در این حالت، نور خورشید یا نور مرئی توسط کاتالیست‌های نانوکامپوزیت جذب می‌شود و الکترون‌ها و حفره‌ها تولید می‌شوند.

این الکترون‌ها می‌توانند به عنوان رادیکال‌های فعال عمل کنند. در فرایند فوتوکاتالیستی، این رادیکال‌ها با ذرات آلی موجود در اسید سیاه تعامل می‌کنند. این تعاملات ممکن است منجر به جذب اکسیژن و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل شوند. رادیکال‌های هیدروکسیل قابلیت اکسایش و از بین بردن ترکیبات آلی را دارند. در صورت تعامل با رنگزای موجود در اسید سیاه، ممکن است به تخریب ساختار آلی رنگزا و به دنبال آن تغییر رنگ به رنگ‌های غیر سمی مانند خاکستری یا دیگر رنگ‌های کمرنگ‌تر منجر شود (شکل ۱۱).



شکل ۱۱ اسید سیاه

بنابراین، فرایندهای فوتوکاتالیستی با استفاده از نانوکامپوزیت‌های گرافنی ترکیب شده با فریت نیکل و اکسید نیکل می‌توانند به عنوان یک روش مؤثر برای حذف و تخریب رنگ‌های سمی اسید سیاه باشند.

در نتیجه، توانمندی نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی در حذف و تخریب رنگ‌های سمی، از جمله رنگ اسید قهوه‌ای، توسط فرایندهای فوتوکاتالیستی و تولید رادیکال‌های فعال، می‌تواند عامل اصلی در این تغییر رنگ باشد. با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد تخریب رنگ‌های سمی اسید قهوه‌ای و اسید سیاه توسط نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی زمینه گرافنی با فریت نیکل و اکسید نیکل، می‌توان به نتیجه‌گیری‌های زیر دست یافت:

نانوکامپوزیت‌های گرافنی با فریت نیکل و اکسید نیکل نشان داده‌اند که با جذب نور و تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، قادر به تحلیل و تخریب رنگ‌های سمی اسید قهوه‌ای و اسید سیاه هستند. در حضور فرایندهای فوتوکاتالیستی، رنگ اسید قهوه‌ای از قهوه‌ای به زرد کمرنگ تغییر یافته (شکل ۱۲) و از طریق تخریب ساختار آلی رنگزای اسید سیاه به رنگ‌های غیر سمی تبدیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که این نانوکامپوزیت‌ها موجب کاهش میزان رنگزای سمی در اسید سیاه و اسید قهوه‌ای می‌شود و توانایی کارایی در فرایند حذف و تخریب رنگ‌های سمی را ارائه می‌دهند. با توجه به موارد فوق، می‌توان نتیجه گرفت که

نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی گرافنی با فریت نیکل و اکسید نیکل می‌توانند به عنوان کاندیدای مؤثری در فرایند حذف و تخریب رنگ‌های سمی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱۲ اسید قهوه‌ای

نتیجه گیری

پژوهش حاضر به منظور سنتز نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی بر پایه گرافن و فریت نیکل با اکسید نیکل، به منظور حذف رنگ‌های سمی اسید قهوه‌ای و اسید سیاه انجام شد. در این پژوهش، ترکیب گرافن، فریت نیکل و اکسید نیکل به منظور ساخت نانوکامپوزیت‌های فوتوکاتالیستی برای حذف رنگ‌های سمی اسید سیاه و اسید قهوه‌ای صورت گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های حاصل از این پژوهش به طور مؤثر و با کارایی بالا قادر به حذف رنگ‌های سمی اسید سیاه و اسید قهوه‌ای هستند. همچنین نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که افزودن گرافن به نانوکامپوزیت باعث بهبود ویژگی‌های مغناطیسی آن می‌شود و نمونه نهایی خود را به عنوان یک ماده مغناطیسی با خصوصیات قوی معرفی می‌کند.

تقدیر و تشکر

مراجع

[1] R. Gusain, K. Gupta, P. Joshi, and O. P. Khatri, “Adsorptive removal and photocatalytic degradation of organic pollutants using metal oxides and their composites: A comprehensive review,” *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 272, p. 102009, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102009

[2] K. K. Kefeni and B. B. Mamba, “Photocatalytic application of spinel ferrite nanoparticles and nanocomposites in wastewater treatment,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 23, p. e00140, 2020. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00140

[3] W. S. Koe, J. W. Lee, W. C. Chong, Y. L. Pang, and L. C. Sim, “An overview of photocatalytic degradation: photocatalysts, mechanisms, and development of photocatalytic membrane,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 3, pp. 2522–2565, 2020. https://doi.org/10.1007/s11356-019-07193-5

[4] G. Mamba, G. Gangashe, L. Moss, S. Hariganesh, S. Thakur, S. Vadivel, A. K. Mishra, G. D. Vilakati, V. Muthuraj, and T. T. Nkambule, “State of the art on the photocatalytic applications of graphene based nanostructures: From elimination of hazardous pollutants to disinfection and fuel generation,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 8, no. 2, p. 103505, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103505

[5] Q. Zhang, L. Jiang, J. Wang, Y. Zhu, Y. Pu, and W. Dai, “Photocatalytic degradation of tetracycline antibiotics using three-dimensional network structure perylene diimide supramolecular organic photocatalyst under visible-light irradiation,” *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 277, p. 119122, 2020. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119122

[6] G. S. El-Sayyad, M. Abd Elkodous, A. M. El-Khawaga, M. A. Elsayed, A. I. El-Batal, and M. Gobara, “Merits of photocatalytic and antimicrobial applications of gamma-irradiated $Co_xNi_{1-x}Fe_2O_4/SiO_2/TiO_2$ (x = 0.9) nanocomposite for pyridine removal and pathogenic bacteria/fungi disinfection: Implication for wastewater treatment,” *RSC Advances*, vol. 10, no. 9, pp. 5241–5259, 2020. https://doi.org/10.1039/C9RA10505K

[7] A. A. Inyinbor, F. A. Adekola, and G. A. Olatunji, “Kinetics, isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase

adsorption of Rhodamine B dye onto Raphia hookerie fruit epicarp," *Water Resources and Industry*, vol. 15, pp. 14–27, 2016. https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.06.001

[8] A. A. Oyekanmi, A. Ahmad, K. Hossain, and M. Rafatullah, "Statistical optimization for adsorption of Rhodamine B dye from aqueous solutions," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 281, pp. 48–58, 2019. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.057

[9] B. L. Pangarkar, M. G. Sane, S. B. Parjane, and M. Guddad, "Status of membrane distillation for water and wastewater treatment—A review," *Desalination and Water Treatment*, vol. 52, no. 28–30, pp. 5199–5218, 2014. https://doi.org/10.1080/19443994.2013.808422

[10] A. Pérez-González, A. M. Urtiaga, R. Ibáñez, and I. Ortiz, "State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates," Water Research, vol. 46, no. 2, pp. 267–283, 2012. https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.046

[11] M. A. C. K. Hansima, M. Makehelwala, K. B. S. N. Jinadasa, Y. Wei, K. G. N. Nanayakkara, A. C. Herath, and R. Weerasooriya, "Fouling of ion exchange membranes used in the electrodialysis reversal advanced water treatment: A review," *Chemosphere*, vol. 263, p. 127951, 2021. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127951

[12] R. Rosal, A. Rodríguez, J. A. Perdigón-Melón, A. Petre, E. García-Calvo, M. J. Gómez, A. Agüera, and A. R. Fernández-Alba, "Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation," *Water Research*, vol. 44, no. 2, pp. 578–588, 2010. https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.004

[13] H. Cui, X. Huang, Z. Yu, P. Chen, and X. Cao, "Application progress of enhanced coagulation in water treatment," *RSC Advances*, vol. 10, no. 34, pp. 20231–20244, 2020. https://doi.org/10.1039/D0RA02979C

[14] S. Wu, L. Shen, Y. Lin, K. Yin, and C. Yang, "Sulfite-based advanced oxidation and reduction processes for water treatment," *Chemical Engineering Journal*, vol. 414, p. 128872, 2021. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128872

[15] F. Meng, J. Xu, H. Dai, Y. Yu, and D. Lin, "Even incorporation of nitrogen into Fe^0 nanoparticles as crystalline Fe_4N for efficient and selective trichloroethylene degradation," *Environmental Science & Technology*, vol. 56, no. 7, pp. 4489–4497, 2022. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c08671

[16] J. Xu, H. Li, and G. V. Lowry, "Sulfidized nanoscale zero-valent iron: Tuning the properties of this complex material for efficient groundwater remediation," *Accounts of Materials Research*, vol. 2, no. 6, pp. 420–431, 2021. https://doi.org/10.1021/accountsmr.1c00037

[17] R. Gusain, K. Gupta, P. Joshi, and O. P. Khatri, "Adsorptive removal and photocatalytic degradation of organic pollutants using metal oxides and their composites: A comprehensive review," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 272, p. 102009, 2019. https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102009

[18] Y. Yuan, R. T. Guo, L. F. Hong, X. Y. Ji, Z. S. Li, Z. D. Lin, and W. G. Pan, "Recent advances and perspectives of MoS_2-based materials for photocatalytic dyes degradation: A review," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 611, p. 125836, 2021. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125836

[19] P. A. K. Reddy, P. V. L. Reddy, E. Kwon, K.-H. Kim, T. Akter, and S. Kalagara, "Recent advances in photocatalytic treatment of pollutants in aqueous media," *Environment International*, vol. 91, pp. 94–103, 2016. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.012

[20] E. T. Thostenson and T.-W. Chou, "On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: Modelling and characterization," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 36, no. 5, p. 573, 2003. https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/5/323

[21] T. Naganuma and Y. Kagawa, "Effect of particle size on the optically transparent nanometer-order glass particle-dispersed epoxy matrix composites," Composites Science and Technology, vol. 62, no. 9, pp. 1187–1189, 2002. https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00059-3

[22] S. Shaheen, Z. Saeed, A. Ahmad, M. Pervaiz, U. Younas, R. R. M. Khan, R. Luque, and S. Rajendran, "Green synthesis of graphene-based metal nanocomposite for electro and photocatalytic activity; recent advancement and future prospective," *Chemosphere*, vol. 311, p. 136982, 2023. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136982

[23] R. Giovannetti, E. Rommozzi, M. Zannotti, and C. A. D'Amato, "Recent advances in graphene-based TiO_2 nanocomposites ($GTiO_2Ns$) for photocatalytic degradation of synthetic dyes," *Catalysts*, vol. 7, no. 10, p. 305, 2017. https://doi.org/10.3390/catal7100305

[24] X. Meng, D. Geng, J. Liu, R. Li, and X. Sun, "Controllable synthesis of graphene-based titanium dioxide nanocomposites by atomic layer deposition," *Nanotechnology*, vol. 22, no. 16, p. 165602, 2011. https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/16/165602